

퍼지상태제어기의 설계와 컨테이너 크레인의 퍼지제어

Design of Fuzzy State Cotroller and Fuzzy Control of Container Crane System

김 맹 준*, 이 원 창*, 강 근 택*
Maeng Jun Kim*, Wonchang Lee*, Geuntaek Kang*

요 약

본 연구는, 복잡한 비선형시스템의 표현에 뛰어난 능력을 갖고 있는 TSK형 퍼지모델로 부터 전체시스템의 안정성을 보장할 수 있는 퍼지상태제어기의 설계방법을 제안한다. 그 퍼지상태제어기는 TSK형 퍼지모델과 같은 형태의 퍼지규칙들로 구성되며, 추론 방법 및 상태제어 파라미터행렬을 구하는 방법은 전체시스템의 상태천이행렬이 원하는 안정한 것이 될 수 있도록 정해진다.

또한 본 논문에서는, 현재 대부분이 숙련가에 의해 수동으로 조작되고 있는 컨테이너 크레인의 새로운 제어 방법을 제시하고 제안한 퍼지상태제어기를 적용한다. 컨테이너 크레인의 모형을 만들어, 제어숙련가의 수동조작으로 결정되는 트롤리와 승강기의 규범속도를 퍼지모델로 표현하고, 트롤리와 승강기가 그 규범 속도에 따르도록 제안한 퍼지상태제어기로 제어 한다. 제안된 방법을 실험한 결과 모형크레인의 궤적이 숙련가에 의해 만들어진 궤적 과 매우 유사하게 됨을 알 수 있었다.

Abstract

The fuzzy controllers are designed on the basis of fuzzy models representing the dynamics of the container crane.

The fuzzy control theory is applied to control a container crane, which is a very complicated system and controlled manually by experts. As reference velocities of trolley and hoist of the container crane, we use those decided by experts, and express them by TSK fuzzy model. We control the crane to follow the reference velocities by using fuzzy state controllers. We made a model container crane and applied the suggested method to it.

I. 서 론

통상 퍼지제어기라고 불리우는 것은 Mamdani^[1]가 제안한 것으로 숙련자의 제어지식을 언어적으로 표현한 것이다. 따라서 숙련자 이상의 제어효과를 기대하기가 어려우며, 퍼지제어기의 파라미터 조정이 발견적이 되어 최

*부산수산대학교 전자공학과
*Department of Electronics, National Fisheries University of Pusan

적의 것을 얻기가 어려우며, 시스템의 안정성도 고려되지 않고 있다.

본 연구는 TSK형 퍼지모델^[2]로 부터 전체시스템의 안정성을 보장할 수 있는 퍼지상태제어기의 설계방법을 제안하며, 숙련운전자에 의존하여 조작되고 있는 복잡한 시스템들 중의 하나인 컨테이너 크레인의 자동운전에 퍼지 제어를 적용하고자 한다.

TSK형 퍼지모델은 결론부가 입출력의 선형관계식으로 된 퍼지규칙들로 구성되어 있으며, 복잡한 비선형시스템을 간단하면서도 높은 정도로 표현할 수 있다. 또한 시스템의 입출력 데이터만으로 퍼지모델을 인식^[3]할 수 있어, 비선형 시스템의 black box적인 모델링에 많이 사용되고 있다^{[4]-[6]}. 따라서 TSK형 퍼지모델을 이용하여 퍼지제어기를 설계할 경우, 복잡한 비선형 시스템의 제어에 뛰어난 능력을 예상할 수 있다. 현재까지 그것에 관해 연구되고 있는 방법들은 다음과 같이 2가지로 나뉘질 수 있다.

(1) TSK형 퍼지모델을 퍼지제어기로 사용되는 경우: 시스템이 복잡한 비선형이거나 인간의 감각이 중요한 역할을 하여 통상 제어이론을 이용한 제어가 불가능하고, 대신 숙련된 사람이 제어를 잘 해낼 때 적용되는 경우이다. 이 경우 그 숙련된 사람이 제어할 때의 입출력 데이터를 이용하여 숙련가의 제어패턴을 TSK형 퍼지모델로 표현하고, 그것을 퍼지제어기로 활용한다. 그 예로는, 모험자동차의 운전^[7], 전기밥솥^[8], 정수장의 약물투입^[1] 등이 있다.

(2) TSK형 모델로 부터 퍼지제어기를 설계하는 경우: 시스템의 입출력 관계가 TSK형 퍼지모델로 표현되어 있을 때, 그 퍼지모델을 토대로 새로운 퍼지제어기를 설계하는 경우이다. 이 때 그 퍼지제어기는 TSK형 퍼지모델과 같은 형태의 퍼지규칙들로 구성된다. 이러한 형태의 퍼지제어기로는 강^[9]에 의해 제안된 것과 Tanaka^[10]에 의해 제안된 것이 있다. 전자의 것은 퍼지제어기의 설계는 간단하지만 전체시스템의 안정성에 대해서는 보장이 없으며, 후자의 것은 Lyapunov의 직접법을 이용하여 전체시스템의 안정성을 고려하지만 제어기 설계 방법이 발전적인 것이기 때문에 쉽게 설계되지 않는다.

본 연구에서는 퍼지모델로 부터 새로운 퍼지제어기를 설계하는 강^[9]의 방법을 개선하고자 한다. 즉 퍼지규칙의 결론부가 선형식으로 되어 있으므로 통상의 선형제어시스템의 이론을 적용하여, 전체시스템의 상태천이행렬이 원하는 안정한 것이 되도록, 발전적인 방법이 아닌 계산에 의해 퍼지상태제어기를 설계하는 방법을 제안한다.

본 연구에서 적용예로 사용한 컨테이너 크레인은, 부두에서 컨테이너를 컨테이너 운반 선박과 운반 차량간에 하역 또는 선적하는 매우 중요한 장비이다. 이 장비는 하역 및 선적에 필요한 시간을 최소화하여 비용 절감에 지대한 공헌을 하고 있다. 컨테이너 크레인은 선로위를 따라 움직이는 트롤리와 로프를 끌어올리고 내리는 승강기로 구성되어 있다. 그런데 컨테이너 크레인의 운동방정식이 매우 복잡한 비선형이고 제약 조건이 다양하여 자동화보다는 전문가에 의해 조작되고 있다. 이러한 어려움을 극복하기 위한 여러 제어 방법들이 제안되어져 왔다. 예를 들어 승강기 로프의 길이를 일정히 하여 운반하는 방법, 이미 결정되어진 3가지 운동(수직운동, 수평운동, 사선운동)에 의한 최적제어 방법^[11], 예측 퍼지제어^[12] 방법 등이 있다. 그러나 이러한 방법들의 결과는 전문가의 조작에 비해 좋은 제어 방법이 되지 못하고 있다.

본 논문에서는 전문가의 조작에 의해 결정되어지는 트롤리와 승강기의 규범속도를 퍼지제어기가 따르도록 컨테이너 크레인을 제어하였다. 즉, 숙련가가 정한 트롤리와 승강기의 규범속도를 퍼지모델로 표현하고, 그 규범속도에 컨테이너 크레인이 따르도록 제어하며 이 때 사용하는 제어기는 본 연구에서 제안하는 퍼지상태제어기이다. 본 연구에서는 컨테이너 크레인의 모형을 제작하여 제안하는 방법을 실제 적용시킨다.

II. 퍼지 상태제어기

2.1 TSK형 퍼지모델

본 논문에서 사용하는 TSK형 퍼지모델은 다음과 같은 퍼지 규칙들로 구성된다.

$$L: \text{If } z_1 \text{ is } P_1^i, z_2 \text{ is } P_2^i, \dots, z_m \text{ is } P_m^i$$

$$\text{then } y^i = c_0^i + c_1^i x_1 + c_2^i x_2 + \dots + c_n^i x_n \quad (1)$$

여기서, z_i 는 전제부 입력변수, P_j^i 는 퍼지집합, y^i 는 i 번째 퍼지규칙의 출력, x_j 는 결론부 입력변수, c_j^i 는 결론부 선형식의 파라미터이며, 출력 y 를 추론하는 방법은 식(2)와 같다.

$$y = \left(\sum_{i=1}^k W^i y^i \right) / \sum_{i=1}^k W^i \quad (2)$$

여기서, k 는 퍼지규칙 수, W^i 는 입력값에 대한 퍼지규칙 L^i 전제부의 적합도를 나타내며, 퍼지 집합 A_j^i 의 z_j 에서 멤버쉽값을 $A_j^i(z_j)$ 로 표현 할 경우, W^i 는 다음과 같이 된다.

$$W^i = \prod_{j=1}^m A_j^i(z_j) \quad (3)$$

위와 같은 퍼지 규칙들로 시스템을 표현하는 것은 입력 공간을 퍼지 분할하여 각 퍼지 부분 공간을 선형 입출력 관계식으로 표현한 형태이며, 전제부의 적합도 W^i 는 입력이 i 번째 퍼지 부분 공간에 포함되는 정도를 나타낸다. 위의 형태의 TSK형 퍼지모델을 입출력 데이터만으로 인식하는 방법은 전제부의 인식과 결론부의 인식으로 나뉘며, 대략 설명하면 다음과 같다. 전제부의 인식이란 전체공간을 어떻게 퍼지부분공간으로 나눌 것인가를 결정하는 문제이다. 이것은 어떤 판단기준을 정하여 그 기준이 최적일 때까지 공간을 계속 나누며, 그 위치를 정하는 것은 비선형 계획법을 사용한다. 이 때 사용하는 판단 기준이란, 작성된 모델이 인식에 사용된 데이터만에 적합한 것이 아니고 실제 시스템을 정확히 표현하는 것인지를 판단하는 기준이며, GMDH법에서 제안되고 있는 방법을 이용한다. 결론부 인식은 퍼지규칙 결론부의 변수와 파라미터를 정하는 문제인데, 이것은 선형시스템의 인식방법을 그대로 이용하여 정한다.

2.2 퍼지상태제어기의 설계법

시스템의 입출력 관계가 TSK형 퍼지모델로 표현되어 있을 때, 그 모델로부터 전체시스템의 상태천이행렬이 안정한 것이 되도록 하는 퍼지제어기의 설계방법을 제안한다.

시스템 입출력을 관계가 다음과 같은 퍼지규칙들로 구성되어 있다고 하자.

$$\begin{aligned} L^i: & \text{If } z_1 \text{ is } P_1^i, z_2 \text{ is } P_2^i, \dots, z_m \text{ is } P_m^i \\ & \text{then } \mathbf{m}^i(k+1) = \Phi^i \mathbf{m}(k) + \Gamma^i \mathbf{n}(k) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, $\mathbf{m}(k)$ 는 상태변수벡터($n \times 1$), $\mathbf{n}(k)$ 는 입력벡터($p \times 1$), Φ^i 는 시스템행렬($n \times n$), Γ^i 는 입력행렬($n \times p$)이다.

위의 퍼지모델로부터 설계되는 퍼지제어기는, 퍼지모델과 같은 수의 퍼지규칙들로 구성되며, 그 퍼지규칙의 전제부는 퍼지모델의 퍼지규칙 전제부와 동일하다. 즉, 퍼지제어기의 i 번째 퍼지규칙은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} C^i: & \text{If } z_1 \text{ is } P_1^i, z_2 \text{ is } P_2^i, \dots, z_m \text{ is } P_m^i \\ & \text{then } \mathbf{n}^i(k) = G^i \mathbf{m}(k) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, G^i 는 상태제어 파라미터행렬($p \times n$)이다. 퍼지상태제어시스템의 block diagram을 그림 1에 보인다.

퍼지규칙(4)들로 구성된 퍼지모델로부터 출력 $\mathbf{m}(k+1)$ 을 추론하는 방법은 식(2)와 같은 무게중심법이지만, 퍼지규칙(5)들로 구성된 퍼지제어기로부터 제어입력 $\mathbf{n}(k)$ 를 추론하는 방법과 G^i 를 구하는 방법은 전체 시스템의 상태천이행렬을 고려하여 다음 정리와 같이 정해진다.

정리: 식(6)과 같이 전체시스템의 원하는 상태천이행렬이 Φ^0 라 하자.

$$\mathbf{m}(k+1) = \Phi^0 \mathbf{m}(k) \quad (6)$$

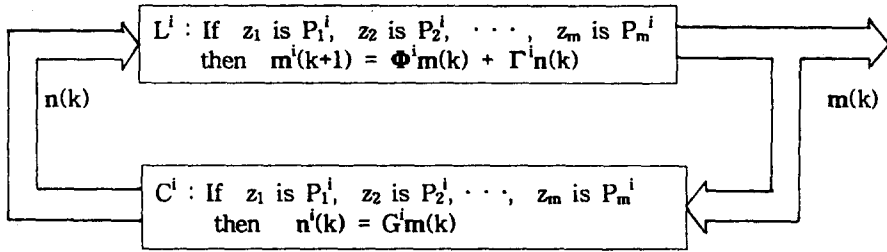


그림 1. 퍼지상태제어시스템의 블럭도
Fig 1. Block diagram of fuzzy state control system

상태제어 파라미터행렬 G^i 는 다음 식(7)을 만족한다고 하자.

$$\Phi^0 = \Phi^i + \Gamma^i G^i \tag{7}$$

퍼지제어기로부터 추론되는 입력 $n^0(k)$ 는 퍼지제어기로부터 다음과 같이 추론한다

$$\sum_{i=0}^m W^i \Gamma^i n^0(k) = \sum_{i=0}^m W^i \Gamma^i n^i(k) \tag{8}$$

그러면 입력 $n^0(k)$ 에 의해 제어되는 전체시스템의 상태천이행렬은 식(6)과 같은 Φ^0 가 된다.

증명. 식(8)을 만족하는 $n^0(k)$ 가 제어입력으로 사용되면 퍼지모델(4)로부터 $m(k+1)$ 이 다음과 같이 추론된다.

$$\begin{aligned} m(k+1) &= \left(\sum_{i=0}^m W^i m^i(k+1) \right) / \sum_{i=0}^m W^i \\ &= \left(\sum_{i=0}^m W^i (\Phi^i m(k) + \Gamma^i n^0(k)) \right) / \sum_{i=0}^m W^i \\ &= \left(\sum_{i=0}^m W^i \Phi^i m(k) + \sum_{i=0}^m W^i \Gamma^i n^0(k) \right) / \sum_{i=0}^m W^i \\ &= \left(\sum_{i=0}^m W^i \Phi^i m(k) + \sum_{i=0}^m W^i \Gamma^i n^i(k) \right) / \sum_{i=0}^m W^i \\ &= \left(\sum_{i=0}^m W^i \Phi^i m(k) + \sum_{i=0}^m W^i \Gamma^i G^i m(k) \right) / \sum_{i=0}^m W^i \\ &= \left(\sum_{i=0}^m W^i (\Phi^i + \Gamma^i G^i) m(k) \right) / \sum_{i=0}^m W^i \\ &= \Phi^0 m(k) \quad \square \end{aligned} \tag{9}$$

III. 모형 컨테이너 크레인의 실험

3.1 모형 컨테이너 크레인

앞서 제안한 알고리즘의 유용성을 알아보기 위해 컨테이너 크레인의 모형을 제작하였다. 전장 길이는 120cm, 높이 100cm, 트롤리와 승강기 구동용 모터는 각각 12W DC 모터를 사용하고, 트롤리의 위치와 로프의 길이 및 컨테이너의 흔들린 각도를 측정하기 위해 세개의 엔코더를 사용하였으며, PWM방식의 모터 구동드라이브 및 엔코더-PC간의 인터페이스 카드를 제작하였다. 본 논문에서 제작한 컨테이너 크레인의 모형을 그림 2에 보인다.

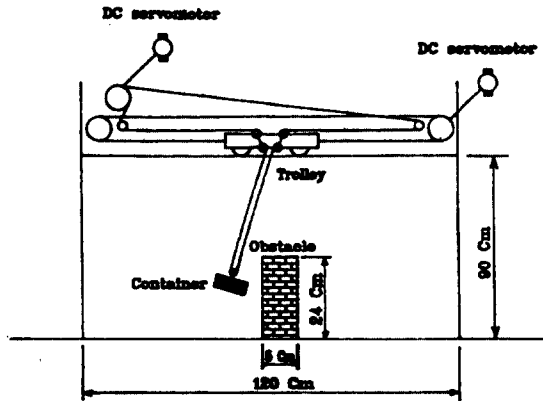


그림 2 컨테이너 크레인 시스템.
Fig 2. A container crane system.

그림 2에서 보는 바와 같이 컨테이너 크레인은 컨테이너를 트롤리와 승강기에 의해 운반되어 진다. 그러므로 컨테이너 크레인 시스템을 제어하기 위해 트롤리 구동 모터와 승강기 구동 모터를 동시에 제어해야 한다. 그런데, 컨테이너 크레인의 운동방정식이 매우 복잡한 비선형이고, 주위 환경에 의한 복잡한 제한조건 때문에 전통적인 제어 방법을 적용하기가 어렵다. 그러나 많은 숙련가들은 수동으로 컨테이너 크레인을 훌륭히 제어한다. 본 논문에서는 숙련가들의 조작에 의해 결정되어진 트롤리와 승강기의 규범속도를 따르도록 퍼지제어기를 설계하였다. 즉 숙련가가 정한 트롤리와 승강기의 규범속도를 퍼지모델로 표현한다. 규범속도에 대한 퍼지모델이 구해지면 컨테이너 크레인은 그 규범속도에 따르도록 제어된다. 이때, 컨테이너 크레인 시스템이 매우 복잡하고 비선형의 특성을 갖고 있으므로 앞 장에서 설명한 퍼지상태제어기를 이용한다.

컨테이너 크레인 퍼지제어시스템의 전체 블록도를 그림 3에 보인다.

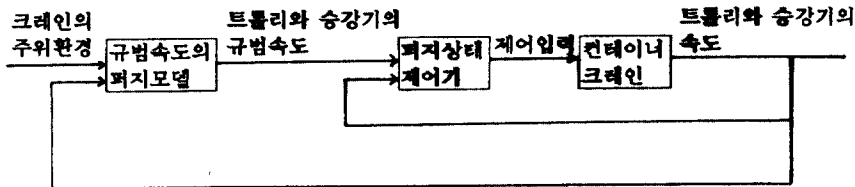


그림 3 컨테이너 크레인 제어 시스템의 전체 블록도.
Fig 3. The overall block diagram of the container crane control system.

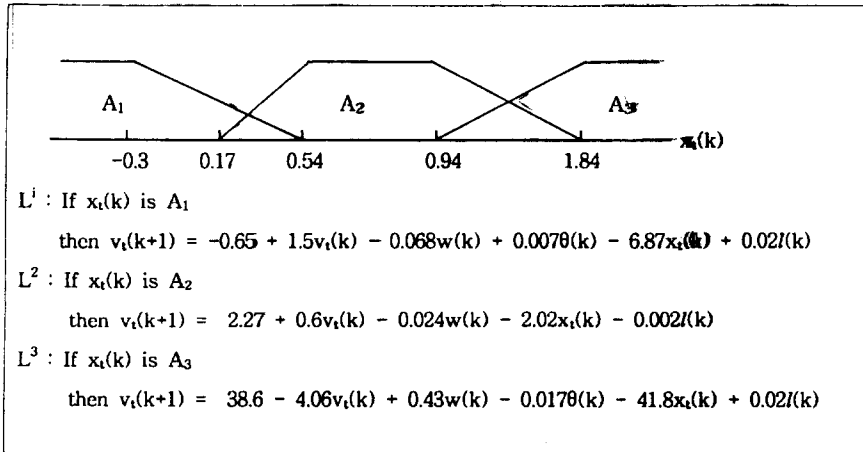
3.1 트롤리와 승강기의 규범속도의 퍼지모델

일반적으로 숙련가들이 컨테이너 크레인을 운전 할 때 다음의 사항을 고려한다.

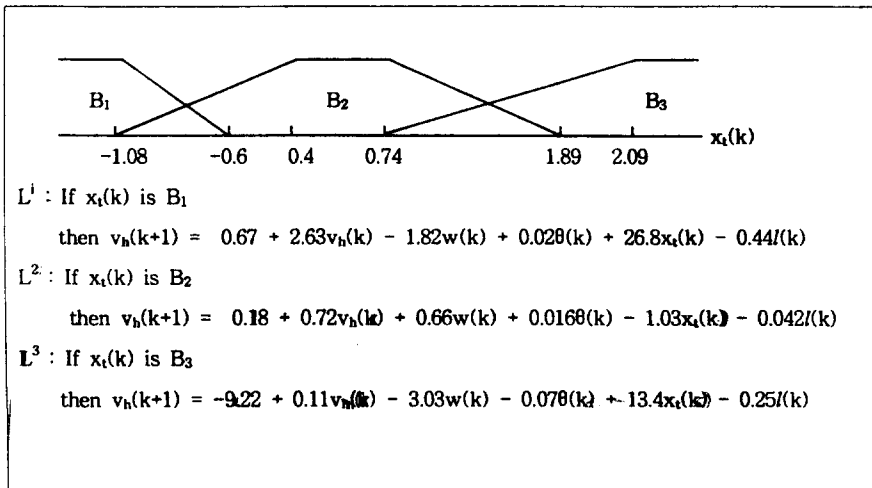
- (1) 최단시간내에 컨테이너를 정확히 운반한다.
- (2) 컨테이너를 운반하는 도중이나 목표지점에 도달 하였을 때 컨테이너의 흔들림을 최소로 한다.
- (3) 컨테이너가 주위의 장애물에 접촉되지 않게 운전한다.

위의 사항을 준수하며 모형 크레인 조작에 전문가가 될 때까지 운전 연습을 하고, 숙련가가 된 후 모형 컨테이너 크레인을 운전할 때 얻어지는 트롤리와 승강기의 규범속도 입출력 데이터를 이용하여 각각의 퍼지모델을 작성

하였다. 모형 크레인을 운전할 때 컨테이너의 무게는 0.5kg-1.5kg, 운반거리는 1.0m-1.2m로 변화 시키면서 데이터를 얻었다. 퍼지추론으로부터 구해진 두 퍼지모델은 그림 4에 나타내었다.



(a) The fuzzy model of trolley reference velocities.



(b) The fuzzy model of hoist reference velocities.

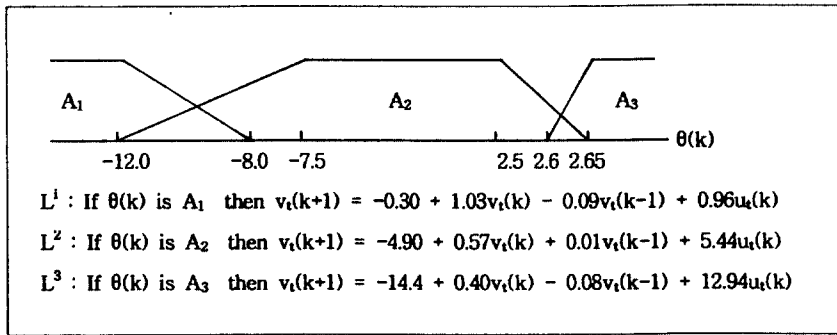
그림 4. 규범속도의 퍼지모델.

Fig 4. The fuzzy models of reference velocities.

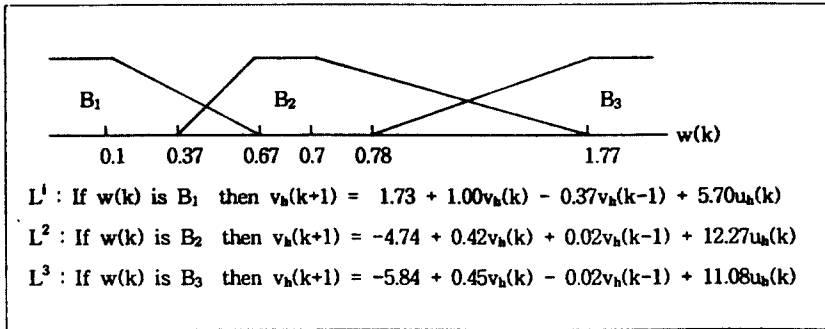
그림 4에서 x_i 는 0과 1사이로 정규화 시킨 트롤리의 위치, v_t 는 트롤리의 속도, v_h 는 승강기의 속도, w 는 컨테이너의 무게, θ 는 컨테이너의 흔들린 각도, l 은 승강기 로프의 길이이다.

3.2 퍼지상태제어기

앞절에서 구한 규범속도에 모형 컨테이너 크레인이 따르도록 제어하여야한다. 그런데, 컨테이너크레인의 동역학이 매우 복잡한 비선형의 특성을 갖고 있어, 앞 장에서 설명한 퍼지상태제어기를 사용하기로 한다. 퍼지상태제어기를 설계하기 위해 먼저 트롤리와 승강기의 동역학을 표현하는 퍼지모델을 작성하여야하며, 이 때 사용되는 데이터를 구하기 위해 모형 크레인의 트롤리 구동모터와 승강기 구동모터에 의사 난수를 입력하여 트롤리와 승강기의 속도를 측정하였다. 그 데이터를 이용하여 인식된 퍼지모델을 그림5에 보인다. u_t 는 트롤리 구동 모터의 제어입력이고 u_h 는 승강기 구동 모터의 제어입력이다.



(a) The fuzzy model of trolley drive motor dynamics.



(b) The fuzzy model of hoist motor dynamics.

그림 5. 모터 동역학에 관한 퍼지모델.

Fig 5. The fuzzy models of the dynamics of motor.

퍼지상태제어기를 설계하기 위해서는 그림 5의 퍼지규칙 결론부를 상태표현으로 바꿔야 한다. 그림 5의 퍼지규칙들을 일반적으로 표현하면 다음과 같다.

$$L^i: \text{If } z \text{ is } P_i \text{ then } x^i(k+1) = a_0^i + a_1^i x(k) + a_2^i x(k-1) + b^i u(k) \quad (10)$$

퍼지규칙(10)의 결론부를 행렬 형식으로 표현하면 다음과 같다.

$$x^i(k+1) = A^i x(k) + B^i u(k) + C^i \tag{11}$$

여기서 $x(k) = (x(k) \ x(k-1))^T$, $B^i = (b^i \ 0)^T$, $C^i = (a_0^i \ 0)^T$, A^i 는 phase variable canonical form matrix이다. 규범입력 추종 제어기 설계를 위한 새로운 상태변수벡터 $m(k)$ 와 $n(k)$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$m(k) = \begin{bmatrix} x(k+1) - x(k) \\ x(k) - r \end{bmatrix} \tag{12}$$

$$n(k) = u(k+1) - u(k) \tag{13}$$

여기서 r 은 규범입력이다. $m(k)$ 와 $n(k)$ 을 사용하면 퍼지규칙(10)은 다음과 같이 된다.

$$L^i: \text{If } z \text{ is } P_i \text{ then } m^i(k+1) = \begin{bmatrix} A^i & 0 \\ D & 1 \end{bmatrix} m(k) + \begin{bmatrix} B^i \\ 0 \end{bmatrix} n(k) \tag{14}$$

여기서 $D = (1 \ 0)$ 이다. 퍼지규칙(14)로 구성된 퍼지모델로부터 앞 장에서 설명한 방법으로 퍼지제어기를 설계하면 그림6이 된다. 그림 5에서 퍼지규칙 전체부에 나오는 퍼지집합 A_i , B_i 는 그림 5에서 나오는 퍼지집합과 같은 것이다. 또한, 이 퍼지상태제어기는 전체시스템의 상태천이행렬 Φ^0 의 고유치들이 0.5, $0.3 \pm j0.3$ 가 되도록 다음과 같이 하였다.

$$\Phi^0 = \begin{Bmatrix} 0.1 & -0.045 & -0.245 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{Bmatrix} \tag{15}$$

C^1 : If $\theta(k)$ is A_1	then $n_k^1(k+1) = (-0.93 \ 0.04 \ -0.245) m(k)$
C^2 : If $\theta(k)$ is A_2	then $n_k^2(k+1) = (-0.48 \ -0.055 \ -0.245) m(k)$
C^3 : If $\theta(k)$ is A_3	then $n_k^3(k+1) = (-0.30 \ 0.003 \ -0.245) m(k)$

(a) The fuzzy state controller of trolley drive motor.

C^1 : If $w(k)$ is B_1	then $n_h^1(k+1) = (-0.90 \ 0.326 \ -0.245) m(k)$
C^2 : If $w(k)$ is B_2	then $n_h^2(k+1) = (-0.32 \ -0.027 \ -0.245) m(k)$
C^3 : If $w(k)$ is B_3	then $n_h^3(k+1) = (-0.35 \ -0.19 \ -0.245) m(k)$

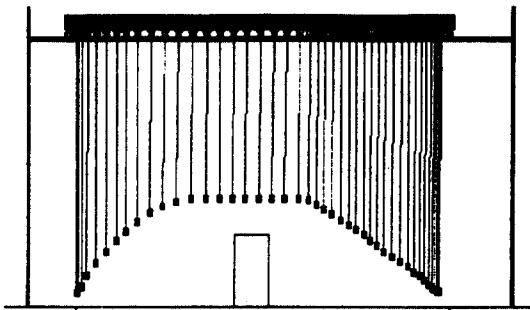
(b) The fuzzy state controller of hoist motor.

그림 6. 퍼지상태제어기.

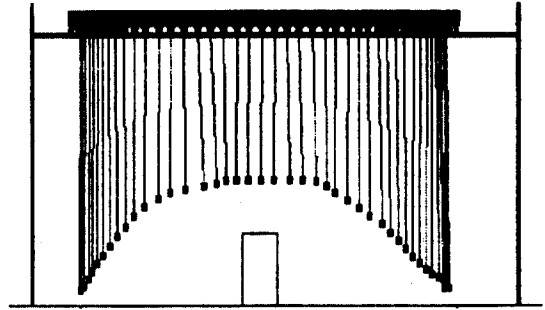
Fig 6. The fuzzy state controller.

3.3 실험결과

규범 속도의 퍼지모델과 설계된 퍼지상태제어기를 제작한 모형 크래인에 적용하여, 컨테이너 무게와 운반거리를 바꿔가면서 실험한 결과를 그림7과 그림8에 보인다.



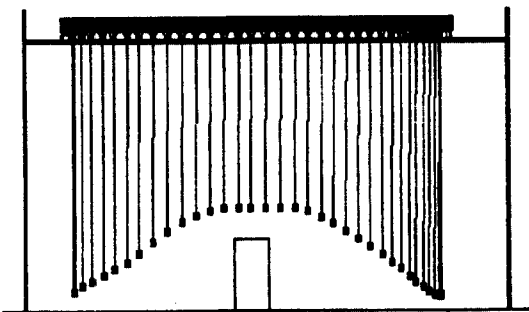
(a) The locus of container controlled by expert.



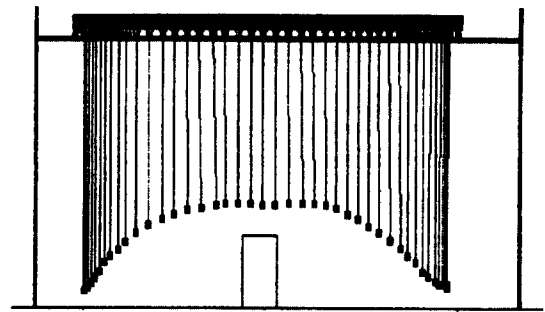
(b) The locus of container controlled by fuzzy controller.

그림 7. 컨테이너의 무게를 1kg, 운반거리를 107.5cm일때의 제어결과.

Fig 7. The control results when the weight of load is 1kg and the carrying length is 107.5cm.



(a) The locus of container controlled by expert.



(b) The locus of container controlled by fuzzy controller.

그림 8. 컨테이너의 무게를 0.5kg, 운반거리를 112.5cm일때의 제어결과.

Fig 8. The control results when the weight of load is 0.5kg and the carrying length is 112.5cm.

IV. 결 론

TSK형 퍼지모델로 부터 새로운 퍼지제어기의 설계법을 제안하였다. 통상의 퍼지제어기 설계는 숙련가의 지식과 발견적이 방법을 이용하는 것에 대해, 본 논문에서 제안한 퍼지상태제어기는 TSK형 퍼지모델로 부터 전체시스템의 안정성을 고려하여 설계된다. 즉 본 논문에서는 전체시스템의 상태천이 행렬이 원하는 안정한 것이 될 수 있도록, 퍼지상태제어기의 구성 방법, 상태제어 파라미터 행렬을 구하는 방법, 추론 방법 등을 제시하였다.

또한 본 논문에서는 컨테이너 크레인의 새로운 제어 방법을 제시하고 제안한 퍼지상태제어기도 적용하였다. 현재 대부분이 숙련가에 의해 수동으로 조작되고 있는 컨테이너 크레인의 모형을 만들어, 제어 숙련가의 수동조작으로 결정되는 트롤리와 승강기의 규범속도를 퍼지모델로 표현하고 트롤리와 승강기가 그 규범 속도에 따르도록 퍼지제어 하였다, 이때 사용한 퍼지제어기는 제안한 퍼지상태제어기이다. 제안된 방법을 실험한 결과 모형크레인의 궤적이 숙련가에 의해 만들어진 궤적과 매우 유사하게 됨을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. E. H. Mamdani, "Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant," Proc. IEEE 121(12) pp.1583-1588, 1976
2. T. Takagi and M. Sugeno, "Fuzzy Identification of Systems and Its Application to Modelling and Control," IEEE Trans. System, Man and Control, Vol. 15, pp.115-132, 1985.
3. M. Sugeno and G. T. Kang, "Structure Identification of Fuzzy Model," Fuzzy Sets and Systems, Vol. 18, pp.326-346, 1986.
4. 姜根澤, 菅野道夫, "ファジイモデリング," 日本計測自動制御學會論文集, 23-6, pp.65-652, 1987.
5. 강근택, 권태하, "반도체소자의 퍼지모델," 대한전자공학회논문지 26-12, pp.106-114, 1989
6. Geuntaek Kang and Kabsuk Oh "Robot Inverse Kinematics and Inverse Jacobian Solution by Using Fuzzy Reasoning" Proceeding of the Korea-Japan Joint Conference on Fuzzy Systems and Engineering, pp. 206-209, 1992
7. M. Sugeno and M. Nishida, "Fuzzy Control of Model car," Fuzzy Sets and Systems 16 pp.103-113, 1985
8. "ファジイ應用製品 技術 日本ファジイ學會誌 3-2, pp.24-25, 1991
9. M. Sugeno and G. T. Kang, "Fuzzy Modelling and Control of Multilayer Incinerator," Fuzzy Sets and Systems, 18 pp.329-346, 1986
10. K. Kazuo and M. Sugeno, "Stability Analysis and Design of Fuzzy Control Systems," Fuzzy Sets and Systems, 45-2, pp.135-156, 1992
11. Y. Sakawa and Y. Shindo, "Optimal Control of Container Crane," Automatics, 18-3, pp.15-33, 1988.
12. S. Yasundo, "Automatic Container Crane Operation Based on a Predictive Fuzzy Control," Trans. of the SICE, 22-10, pp. 1066-1073, 1986. (in Japanese)